

Н.В.БАБКОВА, асп., НТУ «ХПИ»;
И.В.ГАЛУЩАК, ст. преп., НТУ «ХПИ»;
В.Я.ГОРБАТЕНКО, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;
А.М.НИКИТИН, ст. преп., НТУ «ХПИ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ОБЛАСТИ ОРЕБРЕНИЯ ТРУБЫ

Приведено спосіб комбінованого функціонального моделювання з одним модельним параметром. Розроблена і випробувана модельна метода що до вилучення величин модельного параметру у реальних конструкціях на двох паралельних моделях. Показана можливість відсвіжування величини модельного параметру та його розбіг на реальних діапазонах конструктивних розмірів елементів оребрения.

The mode of combined functional simulation with one parameter is reduced. The procedure of obtaining of the model parameter values to actual constructions on two parallel models designed and tested. Possibility of watching of the model value parameter and her dispersion on actual gamut's of constructive sizes of ribbing units is shown.

Разработка теплообменного оборудования паровых котлов связана с использованием спирально-оребрённых поверхностей нагрева с разрезанными ребрами. Существующие рекомендации по выбору конструктивных параметров подобного оребрения не позволяют достигать необходимой эффективности процесса теплообмена [1]. Это и стало одной из главных причин появления данной публикации.

Численное моделирование технологических процессов актуально при экспериментальных исследованиях, оптимизации параметров технологических элементов и конструкций. В то же время, тщательно обоснованный численный эксперимент существенно ускоряет и удешевляет сам процесс разработок. Эффективными оказываются модели, построенные таким образом, чтобы дискретная модель отражала состояние наиболее информативных и напряженных элементов исследуемого процесса. Адекватность моделирования можно оценивать по результатам нескольких (хотя бы двух) численных моделей или результатам численного и физического эксперимента.

Настоящая публикация представляет авторскую разработку комбинированной модели процесса передачи тепла от греющих газов к тепловоспринимающим поверхностям в элементах теплоэнергетических установок, использующих поверхности нагрева с разрезанным спирально-ленточным оребрением.

1 Постановка задачи. Основной задачей выполняемой работы является построение модельного пространства на основании двух разнородных моделей обтекания и получение характерных величин для эквивалентных потоков греющих газов в элементах теплоэнергетических установок.

В данной работе авторами реализован способ определения расчетных зависимостей для получения величины параметра, соответствующего характерному размеру плоского канала, основанный на определении чисел $Re = V_{\infty}L/\nu$

[2] по модельным размерам L задачи. Это позволило моделировать сложное течение газа в пространстве между соседними параллельными поверхностями оребрения, как течение в плоских каналах и как обтекание плоских пластинчатых элементов. Согласно формулировке выделенной задачи можно предложить пошаговую последовательность ее решения.

2 Модель плоского канала. Эскиз трубы со спирально-оребреной поверхностью нагрева с разрезанными ребрами приведен на рис. 1, *а*. Можно ожидать, что при тепловом симметричном нагружении производная

$$\left. \frac{\partial q}{\partial z} \right|_{\substack{z=0 \\ z=0,5 \cdot s_{\text{об}}}} \approx 0, \text{ что соответствует малым тепловым потокам вдоль оси аппли-}$$

кат, тогда расчетная область принимает вид рис. 1, *б*.

Для лепестка, как граничного элемента пространства движения газов, процесс теплоотдачи от газов к поверхности лепестка обусловлен состоянием некоторого объема в потоке газа [3]. На рис. 1, *б* этот объем выделен, как часть пространства между соседними лепестками.

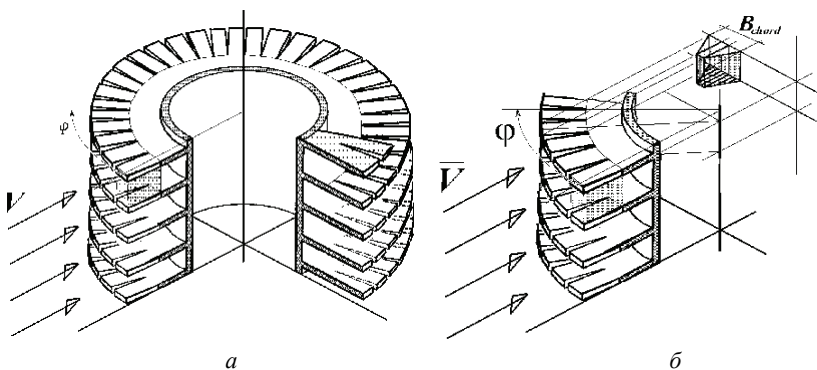


Рисунок 1 – Объем потока между лепестками и его отображение на плоскость YZ

Объем пространства, занимаемого потоком, в щели между соседними лепестками $V = H \cdot B \cdot \Delta = \text{const}$. Проходная площадь в просвете определяется: $S = V/B_{\text{chord}}$. Искомый эквивалентный размер задачи [4]: $L = 4S/\chi$, χ – эквивалент смоченного периметра для канала $\chi = 2(\Delta + B_{\text{chord}})$.

В таком случае $L = \frac{2V}{\left(\Delta \cdot B_{\text{chord}} + B_{\text{chord}}^2 \right)}$, Δ – величина просвета в контрольном газовом объеме, B_{chord} – размер проекции исследуемого объема на ординату, перпендикулярную плоскости, проходящей через ось трубы и направление движения газового потока.

Очевидно, для произвольного положения выделяемого объема относительно системы координат $B_{\text{chord}} = B \cos(\varphi) + H \sin(\varphi)$ – ширина перекрытия потока. Считая самым большим размером $H \succ B, \Delta$, введем параметры выде-

ляемого объема $\sigma_\Delta = \Delta/H$ и $\sigma_B = B/H$.

Тогда величину эквивалентного размера в пределах $0 \leq \varphi \leq \pi/2$, можно представить как функцию относительных параметров:

$$L(H, \sigma_\Delta, \sigma_B, \varphi) = 2V / \left[H^2 (\sigma_\Delta + \sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) (\sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) \right]$$

и далее:

$$L(\Delta, \sigma_\Delta, \sigma_B, \varphi) = 2\Delta\sigma_B / \left[(\sigma_\Delta + \sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) (\sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) \right] \quad (1)$$

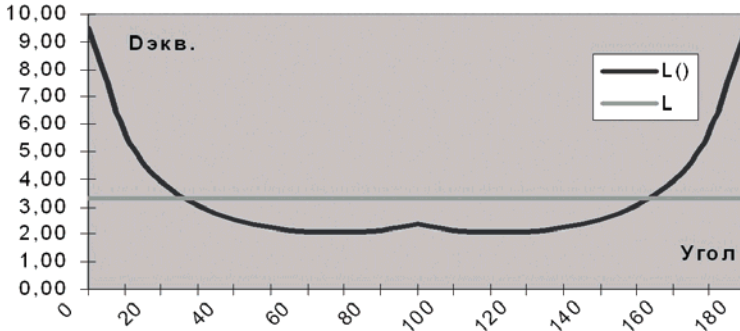


Рисунок 2 – Вид функции (1) и эквивалентный диаметр (2) модельного канала для оребрения: $\Delta = 4$ мм; $B = 4$ мм и $H = 9,5$ мм. $L_{cp}^* = 3,45$ мм

Средний по полувитку оребренного элемента характерный размер в пределах $0 \leq \varphi \leq \pi$ определим по теореме о среднем

$$L_n = \frac{2\Delta\sigma_B}{\pi} \left\{ \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{\left[(\sigma_\Delta + \sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) (\sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)) \right]} + \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{d\varphi}{\left[(\sigma_\Delta + \sin(\varphi) - \sigma_B \cos(\varphi)) (\sin(\varphi) - \sigma_B \cos(\varphi)) \right]} \right\} \quad (2)$$

На рис. 2 показаны характерное распределение эквивалентного диаметра плоского канала, соответствующего выражению (1), и среднеинтегральное его значение согласно (2). Отметим, что в предложенных модельных зависимостях присутствуют все параметры лепестка и оребрения: шаг оребрения – S , длина – H , ширина – B , толщина – $\delta = S - \Delta$. Кроме того, на данном этапе моделирования остается открытым вопрос о соответствии понятия эквивалентного диаметра в полуоткрытом пространстве выделенного объема потока. Поэтому модель потока в данном исполнении считаем лишь качественной

3 Модель обтекания. Рассмотрим тепловоспринимающую поверхность лепестка оребрения. Очевидно, плоскость лепестка играет главную роль в этом процессе, и определяется как $S = B \cdot H = \text{const}$ – величина площади по-

верхности лепестка. В интервале $0 \leq \varphi \leq \pi/2$ проекция лепестка, зависит от угла φ в виде трапеции с основаниями: $B_{chord} = B \cos(\varphi) + H \sin(\varphi)$ и $B_{chord}^* = H \sin(\varphi) - B \cos(\varphi)$. Средняя длина линии тока получится при делении площади трапеции на длину ее нижнего основания $L(\varphi) = S/B_{chord}$ или $L(\varphi) = \frac{S}{B \cos(\varphi) + H \sin(\varphi)}$, что во введенных относительных параметрах для модели канала.

$$L(\varphi) = \frac{B}{\sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)}. \quad (3)$$

Средний по полувитку оребренного элемента характерный размер в пределах $0 \leq \varphi \leq \pi$ определим по теореме о среднем

$$L_{\pi}^* = \frac{B}{\pi} \left\{ \int_0^{\pi/2} \frac{d\varphi}{[\sigma_B \cos(\varphi) + \sin(\varphi)]} + \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{d\varphi}{[(\sin(\varphi) - \sigma_B \cos(\varphi))]} \right\}. \quad (4)$$

Отметим, что в (4) параметрически участвуют только H и B , вариации остальными параметрами оребрения могут оказаться недоступными при дальнейшем использовании только модели обтекания.

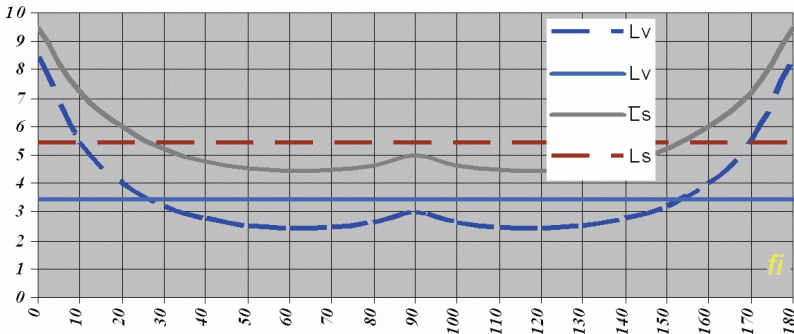


Рисунок 3 – Результаты получены двумя способами для канала $\Delta = 4$ мм; $B = 4$ мм и $H = 9,5$ мм. Средние значения: $L_{cp}^{*1} = 3,45$ мм, $L_{cp}^{*2} = 5,39$ мм

На рис. 3 показаны качественные распределения характерных размеров для течений по обеим моделям.

4 Тестирование моделей. Настоящий этап располагает двумя качественными моделями, которые для $\varphi = \pi/2$ показывают возможность локального максимума, соответствующего положению лепестка перпендикулярно направлению потока. Вид модельных построений (1 и 3) позволяет предположить для модели канала $L_k(\pi/2) \approx \Delta$, а для модели обтекания $L_0(\pi/2) = B$. Коррекция обеих моделей в указанной точке согласует результаты, по обеим вариантам моделирования.

На рис. 4 показаны результаты моделирования характерных размеров по-

тока в диапазоне изменения длины лепестка $6,5 \leq H \leq 11,5$ мм и относительный разбег модельных значений в пределах тестового диапазона.

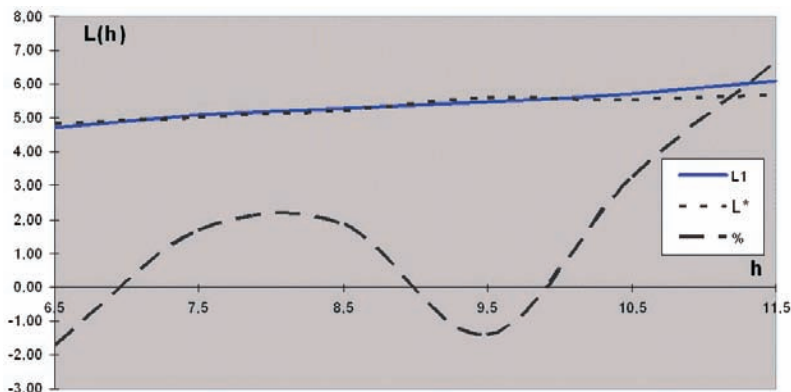


Рисунок 4 – Моделирование для $\Delta = 4$ мм; $B = 4$ мм и $6,5 \leq H \leq 11,5$ мм, пунктир показывает относительный разброс модельных значений в процентах

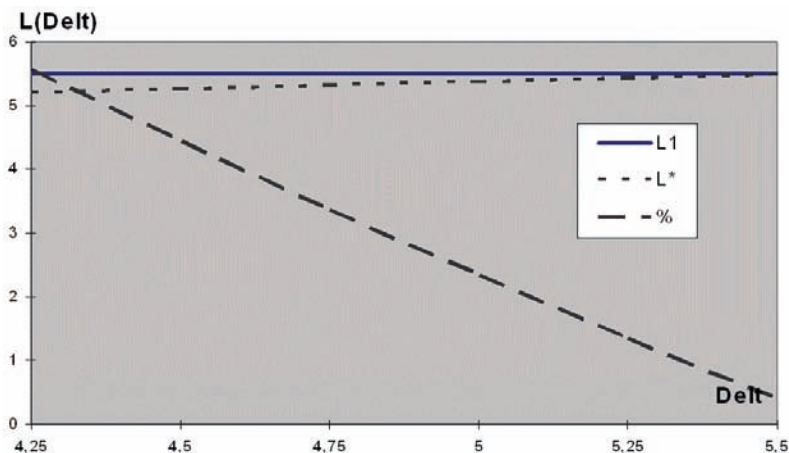


Рисунок 5 – Результат моделирования для $4,25 \leq \Delta \leq 5,5$ мм; $B = 4$ мм и $H = 9,5$ мм

На рис. 5 показаны результаты моделирования характерных размеров потока в диапазоне изменения длины лепестка $4,25 \leq \Delta \leq 5,5$ мм и относительный разбег модельных значений в пределах тестового диапазона.

Подтверждение применимости построенных моделей и окончательная коррекция возможно следующими способами:

- проведением экспериментальных исследований, хотя бы в пределах приведенных диапазонов параметров оребрения,
- численным экспериментом для всего процесса передачи тепла от греющих газов к рабочему телу и экспериментальной проверкой для

- численным экспериментом для передачи тепла от греющих газов к рабочему телу для реализованных типов устройств с опубликованными характеристиками, использующих оребренные поверхности теплообмена.

5 Моделирование процессов конвективного теплообмена. В данной работе авторами реализован [1] способ определения расчетных зависимостей для коэффициентов теплоотдачи на тепловоспринимающие поверхности оребрения основанный на определении чисел Re по усредненным размерам линий тока. Это позволило моделировать сложное течение газа в пространстве между соседними ребрами, как течение в плоском канале заданной толщины.

В связи с этим введены три дополнительные параметра модели, представляющие собой значения эквивалентных размеров для каждого канала. Подобный подход использован в [4], где в качестве определяющего размера эквивалентного канала использована длина линии тока на участке исследования. Для этого варианта модели существенно упрощается вычислительный процесс потому, что для всех трех эквивалентных течений использовалась один и тот же вид описания процесса теплоотдачи со стороны газов, изменялись только значения определяющих размеров L_i , $i = 1, 2, 3$. Одновременно значения чисел Рейнольдса получаются

различными на разных участках границ $Re_{gi} = \frac{w_g L_i}{\nu_g}$, $i = 1, 2, 3$.

Выпишем выражения для коэффициентов теплоотдачи всех границ модельной области. Так, коэффициент теплоотдачи от газов ко всем поверхностям лепестка оребрения принимается равным α_1 , к поверхности кольца оребрения – α_2 , к неоребренной поверхности трубы – α_3 , при этом:

$$\alpha_i = 0,66 \frac{\lambda_g}{L_i} Re_g^{0,5} Pr_g^{0,33}, \quad Re < 40000, \quad (5)$$

$$\alpha_i = 0,037 \frac{\lambda_g}{L_i} Re_g^{0,8} Pr_g^{0,43}, \quad Re \geq 40000, \quad i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Выводы

На приведенных тестах показана возможность применения использованного подхода к задаче моделирования параметров сложного потока на функциональном уровне с одним модельным параметром L . В диапазонах измерения реальных размеров оребрения $4,25 \leq \Delta \leq 5,5$ и $6,5 \leq H \leq 11,5$ мм модельный разброс не превышал 8 %, а в сравнении со значениями, полученными графическим методом – 5 %.

Можно отметить, что модель канала предоставляет более широкие возможности для моделирования параметров оребрения, в сравнении с моделью обтекания. Поэтому в большинстве случаев может оказаться предпочтительной.

Аналогично, применение изложенного подхода реализует моделирование потока для неразрезанной части оребрения, с целью привести к использованию однотипных моделей в задачах для обтекания сложных комбинированных поверхностей. Граничные условия получают более простые выражения и рас-

пределения температур в материале трубы не зависят от положения разреза (продольный или поперечный) относительно оси трубы. Такой подход может существенно упростить реализацию численного решения для задач теплообмена.

Полученные результаты позволяют сравнивать течение теплоносителя в различных конфигурациях оребренных экранов и позволяют использовать их в задачах, связанных с теплообменом между потоком и тепловоспринимающей поверхностью сложной формы.

Унифицированные выражения (5,6) существенно упрощают алгоритмы вычисления граничных значений для условий теплоотдачи на границе греющие газы – тепловоспринимающие оребренные поверхности.

Список литературы: 1. Филиппов Э.Б., Черепенников Г.Б., Лещенко Т.Г. Метод численного исследования тепловой эффективности трубчатой поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением // Теплоэнергетика. – 2006. – № 6. – С. 36-40. 2. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: «Наука», 1978. – 736 с. 3. Л. Л. Товажнянский, А.М. Никитин и др. Исследование гидродинамики турбулентных потоков в моделях: каналов пластинчатых теплообменников // ХПИ, Тез. докл. Всес. конф. «Повышение эффективности, совершенствование процессов и аппаратов хим. Производства». – Харьков: 1985. – Т. 3. 4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред.чл.-корр. АН СССР В.А. Григорьева, В. М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.

Поступила в редколлегию 11.11.2010.

УДК 539.3

Е.О.БЕЗДЕТКО, инж. I кат., НТУ «ХПИ»;
А.А.ОСЕТРОВ, асс., НТУ «ХПИ»

ПРИМЕНЕНИЕ RFM К ЗАДАЧАМ О КОЛЕБАНИЯХ ПЛАСТИН С РАЗРЕЗАМИ ПРИ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ И СПЛАЙН-АППРОКСИМАЦИИ

Розглядаються задачі про власні коливання тонких пластин, що містять розрізи та мають різні види граничних умов. Математична модель задачі уявляє собою диференціальне рівняння четвертого порядку відносно прогину. Розв'язок поставленої задачі виконується варіаційно-структурним методом. Для побудови базисних функцій, які враховують розріз пластини, розташований в середині області, використано структури спеціального виду. При цьому апроксимація невизначених компонент виконується за допомогою степеневих поліномів, а також сплайнів. Отримано чисельні результати для квадратних вільно опертих та жорстко закріплених пластин з вертикальним розрізом, які добре узгоджуються з відомими в літературі. В роботі також наведено форми та частоти коливаль квадратних пластин з прямолінійним нахиленим розрізом. Побудовані структури розв'язків можуть бути використані для криволінійних розрізів, будь-якої геометрії пластини та різних видів крайових умов.

Eigenfunctions and eigenvalues of thin plates with cuts and different boundary conditions are being investigated. The governing equations for plates are differential equations of the fourth order constructed relatively to deflection. The given problem is solved by variation-structural method. Special types of structures are used to build basic functions taking internal cuts in account. Here the approximation of undefined components is performed using power polynomials and splines. Obtained numerical results for